

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 11 月 26 日 (26.11.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/233050 A1

(51) 国际专利分类号:
G05D 1/02 (2020.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/120770

(22) 国际申请日: 2019 年 11 月 26 日 (26.11.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 浙江大学(ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。

(72) 发明人: 朱秋国(ZHU, Qiuguo); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 马尊旺(MA, Zunwang); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 彭勃(PENG, Bo); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 吴俊(WU, Jun); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 熊蓉

(XIONG, Rong); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限公司(HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO., LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区玉古路 147 号黄鸿年科技综合大楼 215 室/邱启旺, Zhejiang 310013 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,

(54) Title: BIPED ROBOT UNEVEN ROAD SURFACE DYNAMIC RUNNING GAIT IMPLEMENTATION METHOD

(54) 发明名称: 一种双足机器人不平整路面动态跑步步态实现方法

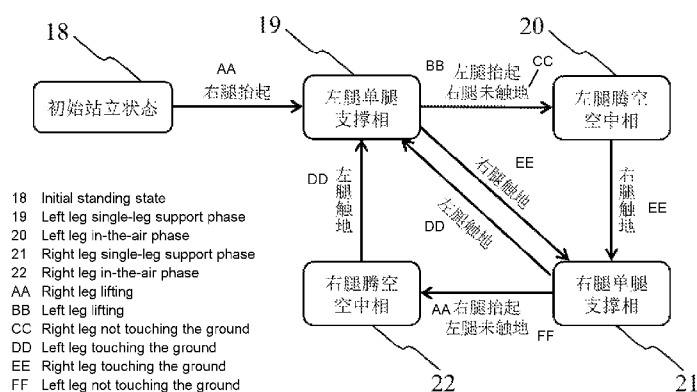


图 2

(57) Abstract: A biped robot indoor and outdoor road surface dynamic running gait implementation method, wherein a state machine for an entire running cycle is arranged, and balance control and motion trajectory planning of a robot is performed in each state. When the robot changes from an in-the-air phase to an on-the-ground phase, posture balancing and ground cushioning are controlled by means of a SLIP model, and after the robot is stably on the ground, the centre of mass of the robot is controlled to a set height by means of a LIP model. In addition, the in-the-air phase of the robot running is generated via support leg and swing leg trajectory planning and state switching, to implement the running motion of the robot, increase the motion speed of the robot, and improve the dynamic balancing performance of the robot running. The method has a certain versatility with respect to common biped robots, and also has good adaptability to uneven outdoor terrain.

NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布：

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。
- 在修改权利要求的期限届满之前进行，在收到该修改后将重新公布(细则48.2(h))。
- 根据申请人的请求，在条约第21条(2)(a)所规定的期限届满之前进行。

(57) 摘要：一种双足机器人在室内外路面的动态跑步步态实现方法，该方法通过设定整个跑步周期的状态机，在各状态中进行机器人的平衡控制与运动轨迹规划；其中，当机器人由飞行相转变为着地相的瞬间，采用SLIP模型控制姿态平衡与着地缓冲；当机器人着地稳定后，采用LIP模型将机器人质心控制到设定高度。同时通过支撑腿与摆动腿的轨迹规划与状态切换生成机器人跑步空中相，实现机器人的跑步运动，提升机器人的运动速度，完善机器人跑步的动态平衡性能。该方法在常见的双足机器人上具有一定的通用性，对于室外不平整地形具有很好的适应能力。

一种双足机器人不平整路面动态跑步步态实现方法

技术领域

本发明涉及一种机器人控制方法，特别是一种双足机器人不平整路面动态跑步实现方法。

背景技术

纵观人类科技文明发展史发现，人类一直孜孜不倦地探索和研究可以模仿人类自身和动物的各类机器人，并梦想着通过机器人实现对人类和动物运动能力甚至是智力方面的模仿。目前，机器人按照驱动方式可以分为轮履式机器人、腿足式机器人和躯干式机器人。其中，腿足式机器人相较于轮履式机器人能更好地适应复杂路面，在崎岖路面有着得天独厚的优势，从人类和其他哺乳动物通过双腿可以适应自然界大部分的地貌环境就可以看出，腿足式机器人更适合于复杂的环境，具有很好的灵活性和机动性。人类通过视觉信息选取合适的落脚点以跨过不同的障碍物和适应不同的路面，腿足式机器人同样可以通过步态规划以及平衡控制等方法适应大部分陆地环境。腿足式也是自然界大部分动物所采取的运动方式，双足机器人采用和人类相似的外形使得它相较于轮履式机器人在亲和力方面有着难以匹敌的优势，可以较好的适应和融入人类的的生活和工作环境。另一方面，在未来利用仿人机器人取代人类在高风险环境下的工作或者重复性较高的体力劳动的是必然趋势。

双足机器人动态跑步步态是腿足机器人领域的重要挑战和研究热点之一。双足机器人采用跑步步态相比较于行走步态可以实现更为快速的运动速度，由于机器人在空中相的时间内还会因为惯性具有向前的速度，所以机器人的前进速度就不再受到机器人连杆长度的限制，比采用行走步态在速度上有了较大的提升。机器人由行走切换为跑步，进一步释放机器人关节电机的性能，大大提高机器人运动的灵活性。相对应的，机器人采用跑步步态对于机器人的动态平衡提出更高的要求，需要机器人在由空中相与支撑相的相互切换中迅速调整控制策略，施加精确的控制作用以使机器人维持期望的运动速度和稳定状态。

综合来看，世界范围内可以实现跑步步态的机器人依然屈指可数，以 ASIMO，ATLAS，ATRIAS 三种型号的机器人最具代表性。ASIMO 是在亚洲范围内最具代表性的双足机器人，该机器人是由日本 Honda 公司 2000 年开始推出的，经过十多年的改进，现在 ASIMO 机器人除了拥有视觉和听觉的能力，还具有避障以及上下阶梯的能力。ASIMO 高约 130cm，重约 48kg，全身共有 30 个自由度，最新一代的 ASIMO 机器人可以以 9km/h 的速度向前奔跑，双腿腾空相持续时间大约为 50ms，同时 ASIMO 还能够做到单脚连续跳跃，双脚连续跳跃，边跳跃边变换方向。但是类似 ASIMO 这样的双足机器人采用的是 ZMP (Zero Moment Point)稳

定性判据,机械结构上采用的是大脚掌的设计,所采用的控制策略与机械结构设计使 ASIMO 对于复杂路面的适应能力有限,ZMP 稳定性判据无法适用于脚掌欠驱动机器人,ZMP 稳定性判据对于双足步行以及跑跳来说过于严苛。目前只能适应室内平整路面的环境,无法在室外不平整路面形成稳定的跑步步态。

俄勒冈州立大学,密歇根大学与卡内基梅隆大学联合推出的 ATRIAS 机器人具有室外行走与跑步能力,最高速度达到 9km/h,可以实现 5km/h 速度下的稳定跑步步态。ATRIAS 可以在草地上或者不平整路面上快速奔跑,能适应具有一定坡度的地面。ATRIAS 的腿部使用四连杆结构,采用电机驱动关节,将机器人绝大部分重量集中在髋部以上,该设计模仿了自然界中双足奔跑速度最快的家禽和鸟类,以此期望获得更高的奔跑速度。ATRIAS 的每条腿有三个自由度,包括髋关节俯仰关节,髋关节偏转关节以及膝关节,由于机器人缺少髋关节偏航关节,ATRIAS 无法实现对方向的自主控制。从 ATRIAS 团队发表的论文成果可以看出,ATRIAS 的整体机构设计与其采用的控制弹性负载倒立摆模型(Spring Linear Inverted Pendulum, SLIP)具有较好的吻合度,也即大部分质量都集中在髋部,而腿部质量设计得很轻。这些结构特点使得 ATRIAS 起跳时的力量是通过髋和膝关节的合力产生的,从而具备了较大的腿部相较于躯干的推重比,且轻量化的腿部在快速摆动对姿态平衡的扰动也较小。SLIP 模型与线性倒立摆模型(Linear Inverted Pendulum, LIP)类似,区别在于 LIP 模型的质心高度是恒定值,而 SLIP 模型中支撑腿在机器人的一个步态周期中存在着地压缩与起跳伸展的过程,质心具有一定的波动性,且对于支撑腿膝关节的力矩输出要求较高,控制算法不一定能适用于大部分双足机器人,尤其是电机驱动型的双足机器人。

Atlas 是美国波士顿动力公司一直在研制开发的双足机器人。Atlas 机器人具有视觉和抓取能力,可以实现搬运,爬起等功能,还能实现雪地行走。从波士顿动力公司最新发布的测试视频可以看出,Atlas 机器人已经可以快速奔跑,跨越体积较大的障碍,甚至还能够实现后空翻、“三连跳”以及自由体操等灵活运动。Atlas 在平衡方面也具有极高的稳定性,既能够在崎岖路面行走也能够在外力剧烈推动身体后继续保持平衡,是目前世界上公认性能最为强大的双足机器人。Atlas 采用液压装置驱动关节力矩,液压装置相较于电机可以输出更大的功率,对于机器人重量不敏感,但是液压依然存在不稳定,控制复杂等缺点,所以大多数研究人员还是更倾向于采用电机驱动双足机器人。同时波士顿动力公司至今尚未公布 Atlas 的控制算法,其他双足机器人平台无法直接借鉴和学习 Atlas 在跑步步态方面的经验。

发明内容

本发明针对现有技术的不足,提出了双足机器人在室内外路面的动态跑步实现方法,同时通过支撑腿与摆动腿的轨迹规划与状态切换生成机器人跑步空中相,实现机器人的跑步运

动，提升机器人的运动速度，完善机器人跑步的动态平衡性能。本发明在常见的双足机器人或仿人机器人平台上具有一定的通用性，对于室外不平整地形具有很好的适应能力。

本发明的目的通过以下技术方案实现：一种双足机器人动态跑步，通过设定机器人跑步的相位状态机以实现各个状态机下的运动规划和控制，在各状态中进行机器人的平衡控制与运动轨迹规划。当机器人由飞行相转变为着地相的瞬间，采用 SLIP 模型控制姿态平衡与着地缓冲；当机器人着地稳定后，采用 LIP 模型将机器人质心控制到设定高度。通过机器人着地控制和支撑相控制，相应的姿态控制、高度控制和速度控制方法，以及支撑腿与摆动腿的运动轨迹规划，从而实现双足机器人的跑步步态。

进一步的，该方法具体为：在机器人前进过程中将机器人的躯干简化为一个集中所有质量的质心，机器人的腿简化为一个连接躯干和脚的无质量、无惯量、可伸缩的连杆，将质心约束在约束平面运动，设计双足机器人的状态机，使双足机器人在状态机中各状态间持续稳定的切换，在机器人各状态中实现机器人的平衡控制。其中双足机器人的状态机是指机器人稳定前进过程按照左右腿是否处于支撑相划分为四种状态，分别是左腿支撑相，左腿腾空空中相，右腿支撑相，右腿腾空空中相，状态机的稳定周期性切换形成了双足机器人的跑步步态，在各状态设置相应的控制器以实现机器人的平衡控制以及摆动腿的运动控制。其中双足机器人的平衡控制包括身体姿态平衡控制，质心高度平衡控制和机器人前进速度控制。

质心高度平衡控制，即控制机器人的身体质心在平行于地面的约束平面内运动，通过对地面作用力的控制以实现机器人质心高度的控制。设定作用力公式如下：

$$F_z = K_{pf}(h_{set} - h) + K_{df}(-v_h) + Mg$$

其中 h_{set} 为设定的质心高度； h 为实际质心高度； v_h 为质心竖直方向上的速度； K_{pf} 与 K_{df} 为待确定的系数，根据实际的机器人调节； M 为机器人质心的重量； g 为重力加速度。

进一步地，对于机器人身体姿态平衡控制，引入 PD 控制使机器人身体躯干的姿态角度保持在稳定范围附近，具体身体姿态平衡控制公式如下：

$$\tau_h = K_p(q_d - q) + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + \tau_f$$

其中 τ_h 为身体躯干的平衡力矩； q_d 为期望身体姿态角； q 为身体姿态角度； $\dot{q}_d$ 为期望身体姿态角速度； $\dot{q}$ 为身体姿态角速度； K_p 与 K_d 分别为相应待确定的反馈系数矩阵，与实际双足机器人平台相关； τ_f 为质心重力作用于支撑腿髋关节产生的前馈力矩；

进一步地，机器人前进速度控制，通过双足机器人的落脚点控制机器人质心速度趋近期望速度或是维持稳定在期望速度。具体落脚点坐标公式如下：

$$L_f = K_{0v} + K_{pv}v + K_{dv}(v - v_d)$$

其中 L_f 为落脚点的坐标； v 为机器人的速度； v_d 为期望速度； K_{0v} , K_{pv} , K_{dv} 均为待确定的系数矩阵，与单腿支撑相时间以及机器人的质心高度有关。

进一步的，所述支撑腿与摆动腿的运动轨迹规划是指利用设定相位信息规划支撑腿收缩以及摆动腿伸展。当双足机器人处于单腿支撑相即将结束的时刻，此时状态机开始切换，进入相对应的双腿腾空相，设定相位信息置零，上一状态的支撑腿与摆动腿互换，双足机器人控制程序控制支撑腿与摆动腿的运动以实现双足机器人空中相，在腾空相的过程中的双腿的摆动轨迹公式如下：

$$x_{sw} = \begin{cases} x_s & p \leq \Delta p \\ f_{swx}(x_s, x_f, p, T) & p > \Delta p \end{cases}$$

$$z_{sw} = \begin{cases} \Delta h \frac{p}{\Delta p} + z_s(1 - \frac{p}{\Delta p}) & p \leq \Delta p \\ f_{swz}(\Delta h, z_f, p, T) & p > \Delta p \end{cases}$$

$$z_{su} = z_{sus} \frac{p}{\Delta p} + z_{suf}(1 - \frac{p}{\Delta p}) \quad p \leq \Delta p$$

其中， x_{sw} , z_{sw} 为摆动腿末端点的坐标； z_{su} 为支撑腿末端点的纵坐标； x_s , z_s 为摆动腿末端点的初始坐标； x_f , z_f 为摆动腿末端点的设定坐标； Δh 为设定的抬腿高度； p 为设定的相位信息，与当前步态的执行时间成正相关， Δp 为设定空中相相位时长； T 为跨步周期； $f_{swx}(x_s, x_f, p, T)$, $f_{swz}(\Delta h, z_f, p, T)$ 为摆动腿的规划曲线； z_{sus} , z_{suf} 为支撑腿末端点的起始和设定的纵坐标。在摆动腿抬起而支撑腿尚未落地的过程中出现双腿均腾空的状态从而实现双足机器人的跑步步态。

本发明的有益效果是，本发明提出了双足机器人不平整路面动态跑步步态实现方法，该方法中当机器人由飞行相转变为着地相的瞬间，采用 SLIP 模型控制姿态平衡与着地缓冲；当机器人着地稳定后，采用 LIP 模型将机器人质心控制到设定高度，从而实现双足机器人的动态平衡控制与轨迹运动规划，进而实现双足机器人的跑步步态。目前绝大多数双足机器人都是采用 LIP 模型与 ZMP 稳定性判据以实现双足机器人的行走步态，采用的大脚掌的设计对于双足机器人的运动能力产生很大的限制，而本方法避免了采用 ZMP 稳定性判据的局限性，成功实现双足机器人稳定的跑步步态，采用小脚掌即可实现动态的平衡稳定性，使得双足机器人具备了实现不平整路面的稳定跑步和行走的能力。与采用 SLIP 模型的 ATRIAS 机器人相比，

本方法在着地瞬间采用了 SLIP 模型进行控制, 同样具有 ATRIAS 的着地缓冲作用, 降低了着地冲击力对机器人本体机械机构的损伤, 且在着地稳定后将机器人质心控制到设定高度, 而不像 SLIP 模型一样需要将质心推到一定的高度从而产生空中飞行相, 本方法的空中相是通过当前支撑腿的快速切换状态而产生的, 因此降低了机器人膝盖关节的输出力矩要求, 这种方法对于关节性能受到电机能力约束的机器人同样具有适用性; 最后, 采用 SLIP 模型需要更加准确的状态估计, 当支撑腿开始伸展起跳时, 机器人质心产生离地向上的速度, 需要对于双足机器人起跳速度以及质心姿态做出精确的估计, 对于传感器的精度和算法要求较高, 增加双足机器人的开发成本。相比较而言, 采用本方法的控制策略相较于 LIP 模型或 SLIP 模型, 极大地降低了双足机器人机械结构设计和关节性能的要求, 可以更好地满足大部分性能受限的机器人进行跑步步态开发与实验, 具有更好的灵活性和通用性, 将进一步缩短开发周期和降低开发成本。

附图说明

图 1 是双足机器人的整体模型图, 其中 (a) 为主视图, (b) 为侧视图;

图 2 是双足机器人状态机切换图;

图 3 是 HIP 模型示意图;

图 4 是双足机器人右腿单腿支撑相;

图 5 是双足机器人右腿腾空空中相;

图 6 是双足机器人左腿单腿支撑相;

图中, 躯干 1、右大腿连杆 2、右小腿连杆 3、右脚掌 4、左大腿连杆 5、左小腿连杆 6、左脚掌 7、右髋偏航关节 8、右髋侧摆关节 9、右髋俯仰关节 10、右腿膝关节 11、右腿踝关节 12、左髋偏航关节 13、左髋侧摆关节 14、左髋俯仰关节 15、左腿膝关节 16、左腿踝关节 17、初始站立状态 18、左腿单腿支撑相 19 左腿腾空空中相 20、右腿单腿支撑相 21、右腿腾空空中相 22、等效连杆 23、等效质心 24、摆动腿运动轨迹 25。

具体实施方式

以下结合附图进一步说明本发明。

本发明提出的双足机器人不平整路面动态跑步步态实现方法, 将该方法构建成一个用于控制双足机器人不平整路面动态跑步的线性倒立摆和弹性负载倒立摆相结合的混合倒立摆 HIP (Hybrid Inverted Pendulum) 模型, 以便对本方法作进一步说明。HIP 模型是指将机器人的躯干简化为一个集中所有质量的质心, 机器人的腿简化为一个连接躯干和脚的无质量、无惯量、可伸缩的连杆, 将质心约束在约束平面运动。当机器人由飞行相转变为着地相的瞬间, 机器人与地面之间存在较大冲击力, 采用的 HIP 表现出 SLIP 模型的特性, 质心压缩以缓冲

着地的冲击力；当机器人着地稳定后 HIP 表现出 LIP 模型的特性，将机器人质心控制到设定高度。其中双足机器人的状态机是指机器人稳定前进过程按照左右腿是否处于支撑相划分为四种状态，分别是左腿支撑相，左腿腾空空中相，右腿支撑相，右腿腾空空中相，状态机的稳定周期性切换形成了双足机器人的跑步步态，在各状态设置相应的控制器以实现机器人的平衡控制以及摆动腿的运动控制。

如图 1-6 所示，本发明双足机器人跑步步态的实现方法，包括采用 HIP 模型实现双足机器人的平衡控制以及利用支撑腿与摆动腿运动轨迹规划实现双足机器人的跑步步态。双足机器人的结构如图 1 所示，主要由躯干 1 和下肢组成，下肢包括右大腿连杆 2、右小腿连杆 3、右脚掌 4、左大腿连杆 5、左小腿连杆 6、左脚掌 7、右髋偏航关节 8、右髋侧摆关节 9、右髋俯仰关节 10、右腿膝关节 11、右腿踝关节 12、左髋偏航关节 13、左髋侧摆关节 14、左髋俯仰关节 15、左腿膝关节 16、左腿踝关节 17。其中躯干 1 中装有惯性测量单元，测量身体的姿态信息；左脚掌 7 与右脚掌 4 中装有力传感器，测量足底与地面的接触力的大小。下文对该控制方法作出详细说明。

HIP 模型如图 3 所示，将机器人的躯干 1 简化为一个集中所有质量的质心 24，机器人的腿简化为一个连接躯干和脚的无质量、无惯量和可伸缩的连杆 23，将质心约束在约束平面运动。双足机器人的状态机是指将机器人稳定前进过程按照左右腿是否处于支撑相划分为四种状态，分别是左腿支撑相 19，左腿腾空空中相 20，右腿支撑相 21，右腿腾空空中相 22，如图 2 所示，双足机器人由初始站立状态 18 开始跳入状态机的循环中，在相应的状态设置相应的控制器以实现身体躯干的平衡以及摆动腿的运动规划，状态机跳转方向唯一，稳定且周期性的状态机切换形成双足机器人的稳定前进过程。双足机器人的平衡控制包括身体的姿态平衡控制，质心高度平衡控制与机器人前进速度控制。本方法避免了采用 ZMP 稳定性判据的局限性，成功实现双足机器人稳定的跑步步态，采用小脚掌即可实现动态的平衡稳定性，使得双足机器人具备了实现不平整路面的稳定跑步和行走的能力。

身体的姿态平衡控制，即控制机器人身体躯干的姿态角度保持在稳定范围附近，在双足的单腿支撑相的过程中，采用经典身体姿态平衡控制策略，利用 PD 控制实现身体躯干 1 的平衡，具体姿态平衡控制公式如下：

$$\tau_h = K_p(q_d - q) + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + \tau_f$$

其中 τ_h 为身体躯干的平衡力矩； q_d 为期望身体姿态角； q 为身体姿态角度； $\dot{q}_d$ 为期望身体姿态角速度； $\dot{q}$ 为身体姿态角速度； K_p 与 K_d 分别为相应待确定的反馈系数矩阵，与实际双足机器

人平台相关； τ_f 为质心重力作用于支撑腿髋关节产生的前馈力矩，利用支撑腿髋关节产生 τ_h 以实现机器人身体躯干的平衡。

质心高度平衡控制，即控制机器人的身体质心在平行于地面的约束平面内运动，基于 LIP 模型理论，通过对地面作用力的控制实现身体质心高度的平衡，如图 3 所示，通过对 F_z 的控制实现质心高度平衡控制， F_z 设定为：

$$F_z = K_{pf}(h_{set} - h) + K_{df}(-v_h) + Mg$$

其中 h_{set} 为设定的质心高度； h 为实际质心高度； v_h 为质心竖直方向上的速度； K_{pf} 与 K_{df} 为待确定的系数； M 为机器人质心的重量； g 为重力加速度。通过该式使机器人质心始终稳定在设定高度。

机器人前进速度控制，通过双足机器人的落脚点控制机器人质心速度趋近期望速度或是维持稳定在期望速度，通过机器人前进方向的落脚点坐标即机器人前进方向的步长实现对机器人速度的控制，具体落脚点坐标公式如下：

$$L_f = K_{0v} + K_{pv}v + K_{dv}(v - v_d)$$

其中 L_f 为落脚点的坐标； v 为机器人的速度； v_d 为期望速度； K_{0v} 、 K_{pv} 、 K_{dv} 均为待确定的系数矩阵，与单腿支撑相时间以及质心高度有关。将落脚点坐标设定为一个步态周期中摆动腿摆动的终点坐标，以此实现通过落脚点对于质心速度的控制。

所述支撑腿与摆动腿轨迹规划是指利用相位信息与足底力传感器的信息规划支撑收缩以及摆动腿伸展，实现双足机器人的双腿腾空相。以右腿单腿支撑相切换为左腿单腿支撑相为例，如图 4 所示，当双足机器人处于单腿支撑相即将结束的时刻，将此刻定义为一个步态周期的开始，设定相位信息为零，支撑腿与摆动腿互换，右腿成为摆动腿，左腿成为支撑腿，双足机器人控制程序控制支撑腿与摆动腿的运动以实现双足机器人空中相，机器人双腿的摆动轨迹公式如下：

$$x_{sw} = \begin{cases} x_s & p \leq \Delta p \\ f_{swx}(x_s, x_f, p, T) & p > \Delta p \end{cases}$$

$$z_{sw} = \begin{cases} \Delta h \frac{p}{\Delta p} + z_s(1 - \frac{p}{\Delta p}) & p \leq \Delta p \\ f_{swz}(\Delta h, z_f, p, T) & p > \Delta p \end{cases}$$

$$z_{su} = z_{sus} \frac{p}{\Delta p} + z_{suf}(1 - \frac{p}{\Delta p}) \quad p \leq \Delta p$$

其中, x_{sw} , z_{sw} 为摆动腿末端点的坐标; z_{su} 为支撑腿末端点的纵坐标; x_s , z_s 为摆动腿末端点的初始坐标; x_f , z_f 为摆动腿末端点的设定坐标; Δh 为设定的抬腿高度; p 为设定的相位信息, 与当前步态的执行时间成正相关, Δp 为设定空中相相位时长; T 为跨步周期; $f_{swx}(x_s, x_f, p, T)$, $f_{swz}(\Delta h, z_f, p, T)$ 为摆动腿的规划曲线; z_{sus} , z_{suf} 为支撑腿末端点的起始和设定的纵坐标。根据上述机器人双腿的摆动轨迹, 机器人在一个步态周期的开始阶段控制支撑腿向下运动, 控制摆动腿向上抬起, 当摆动腿向上收缩的速度大于质心速度竖直向下的分量时, 支撑腿末端产生向下的速度而摆动腿末端会产生向上的速度, 当机器人摆动腿收缩的速度较快时, 摆动腿已经抬起, 而支撑腿尚未落地, 机器人处于双脚腾空的状态, 如图 5 所示。本方法的空中相是通过当前支撑腿的快速切换状态而产生的, 因此降低了机器人膝盖关节的输出力矩要求, 这种方法对于关节性能受到电机能力约束的机器人同样具有适用性当机器人处于双腿腾空相时, 忽略空气阻力的影响, 机器人的质心会保持现有的运动状态, 机器人在前进方向上会继续保持前进的速度。当支撑腿触地或者设定相位信息 $p > \Delta p$ 时, 机器人进行状态机切换, 由双腿腾空相进入单腿支撑相, 如图 6 所示, 同时控制程序会控制摆动腿使摆动腿按照设定的摆动轨迹 25 运动, 摆动轨迹由 $f_{swx}(x_s, x_f, p, T)$, $f_{swz}(\Delta h, z_f, p, T)$ 决定, 利用上述方法基于 HIP 模型对双足机器人支撑腿实施相应的控制策略。如此循环往复, 从而形成双足机器人稳定的跑步步态。总的来说, 采用 HIP 模型控制策略相较于 LIP 模型或 SLIP 模型, 极大地降低了双足机器人机械结构设计和关节性能的要求, 控制算法可以适用于大部分双足机器人, 尤其是电机驱动型的双足机器人, 具有更好的灵活性和通用性。

权利要求书

1.一种双足机器人不平整路面动态跑步步态实现方法，通过设定整个跑步周期的状态机，在各状态中进行机器人的平衡控制与运动轨迹规划；其特征在于，该方法通过支撑腿与摆动腿的运动轨迹规划与状态切换生成机器人跑步飞行相，当机器人由飞行相转变为着地相的瞬间，采用 SLIP 模型控制姿态平衡与着地缓冲；当机器人着地稳定后，采用 LIP 模型将机器人质心控制到设定高度。

2.根据权利要求 1 所述双足机器人不平整路面动态跑步步态实现方法，其特征在于，该方法具体为：

将机器人的躯干简化为一个集中所有质量的质心，机器人的腿简化为一个连接躯干和脚的无质量、无惯量、可伸缩的连杆，将质心约束在约束平面运动，并将机器人稳定前进过程的相位状态机按照左右腿是否处于支撑相划分为四种状态，分别是左腿支撑相，左腿腾空空中相，右腿支撑相，右腿腾空空中相，状态的稳定周期性切换形成了双足机器人的跑步步态，在各状态中进行机器人的平衡控制以及支撑腿与摆动腿的运动轨迹规划。其中双足机器人的平衡控制包括身体姿态平衡控制，质心高度平衡控制和机器人前进速度控制。

所述质心高度平衡控制，通过对地面作用力的控制以实现机器人质心高度的控制。设定作用力公式如下：

$$F_z = K_{pf}(h_{set} - h) + K_{df}(-v_h) + Mg$$

其中 h_{set} 为设定的质心高度； h 为实际质心高度； v_h 为质心竖直方向上的速度； K_{pf} 与 K_{df} 为待确定的系数； M 为机器人质心的重量； g 为重力加速度。

3. 根据权利要求 2 所述双足机器人不平整路面动态跑步步态实现方法，其特征在于，所述身体姿态平衡控制的公式如下：

$$\tau_h = K_p(q_d - q) + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + \tau_f$$

其中 τ_h 为身体躯干的平衡力矩； q_d 为期望身体姿态角； q 为身体姿态角度； $\dot{q}_d$ 为期望身体姿态角速度； $\dot{q}$ 为身体姿态角速度； K_p 与 K_d 分别为相应待确定的反馈系数矩阵，与实际双足机器人平台相关； τ_f 为质心重力作用于支撑腿髋关节产生的前馈力矩；

4. 根据权利要求 2 所述双足机器人不平整路面动态跑步步态实现方法，其特征在于，所述机器人前进速度控制，通过双足机器人的落脚点控制机器人质心速度趋近期望速度或是维持稳定在期望速度。具体落脚点坐标公式如下：

$$L_f = K_{0v} + K_{pv}v + K_{dv}(v - v_d)$$

其中 L_f 为落脚点的坐标； v 为机器人的速度； v_d 为期望速度； K_{0v}, K_{pv}, K_{dv} 均为待确定的系数矩阵，与单腿支撑相时间以及机器人的质心高度有关。

5. 根据权利要求 2-5 任一项所述双足机器人不平整路面动态跑步步态实现方法，其特征在于，所述支撑腿与摆动腿的运动轨迹规划利用设定相位信息规划支撑腿收缩以及摆动腿伸展。当双足机器人处于单腿支撑相即将结束的时刻，此时状态开始切换，进入相对应的双腿腾空相，设定相位信息置为零，支撑腿与摆动腿互换，双足机器人控制程序控制支撑腿与摆动腿的运动以实现双足机器人飞行相，在飞行相的过程中的双腿的摆动轨迹公式如下：

$$x_{sw} = \begin{cases} x_s & p \leq \Delta p \\ f_{swx}(x_s, x_f, p, T) & p > \Delta p \end{cases}$$

$$z_{sw} = \begin{cases} \Delta h \frac{p}{\Delta p} + z_s(1 - \frac{p}{\Delta p}) & p \leq \Delta p \\ f_{swz}(\Delta h, z_f, p, T) & p > \Delta p \end{cases}$$

$$z_{su} = z_{sus} \frac{p}{\Delta p} + z_{suf}(1 - \frac{p}{\Delta p}) \quad p \leq \Delta p$$

其中， x_{sw} ， z_{sw} 为摆动腿末端点的坐标； z_{su} 为支撑腿末端点的纵坐标； x_s ， z_s 为摆动腿末端点的初始坐标； x_f ， z_f 为摆动腿末端点的设定坐标； Δh 为设定的抬腿高度； p 为设定的相位信息，与当前步态的执行时间成正相关， Δp 为设定飞行相相位时长； T 为跨步周期； $f_{swx}(x_s, x_f, p, T)$ ， $f_{swz}(\Delta h, z_f, p, T)$ 为摆动腿的规划曲线； z_{sus} ， z_{suf} 为支撑腿末端点的起始和设定的纵坐标。在摆动腿抬起而支撑腿尚未落地的过程中出现双腿均腾空的状态从而实现双足机器人的跑步步态。

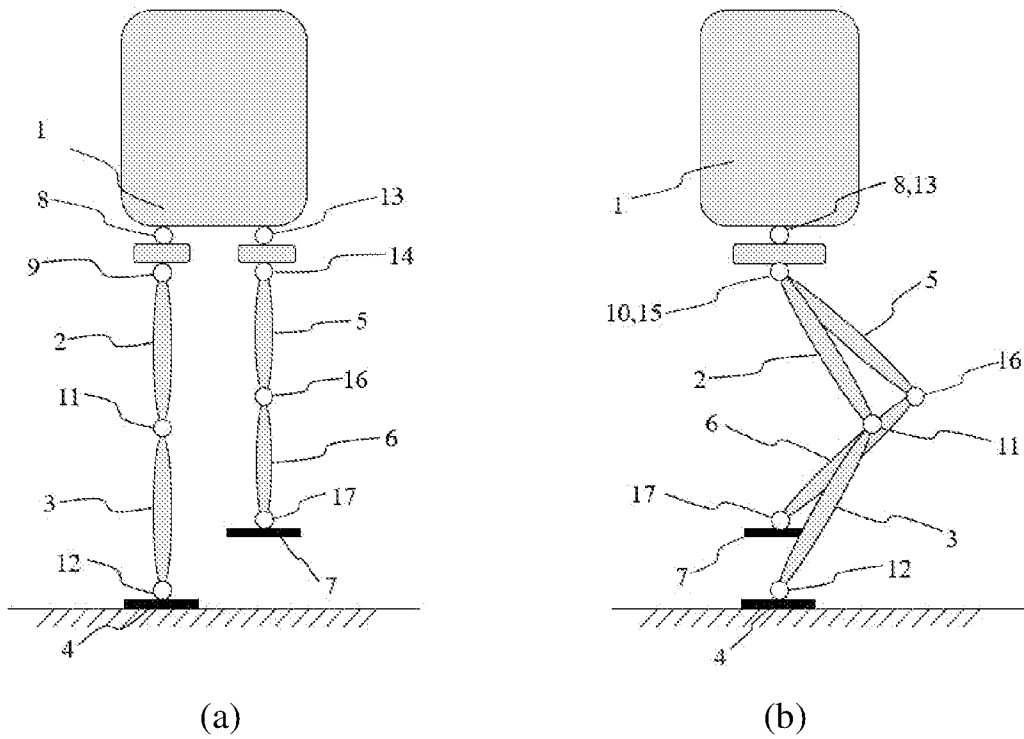


图 1

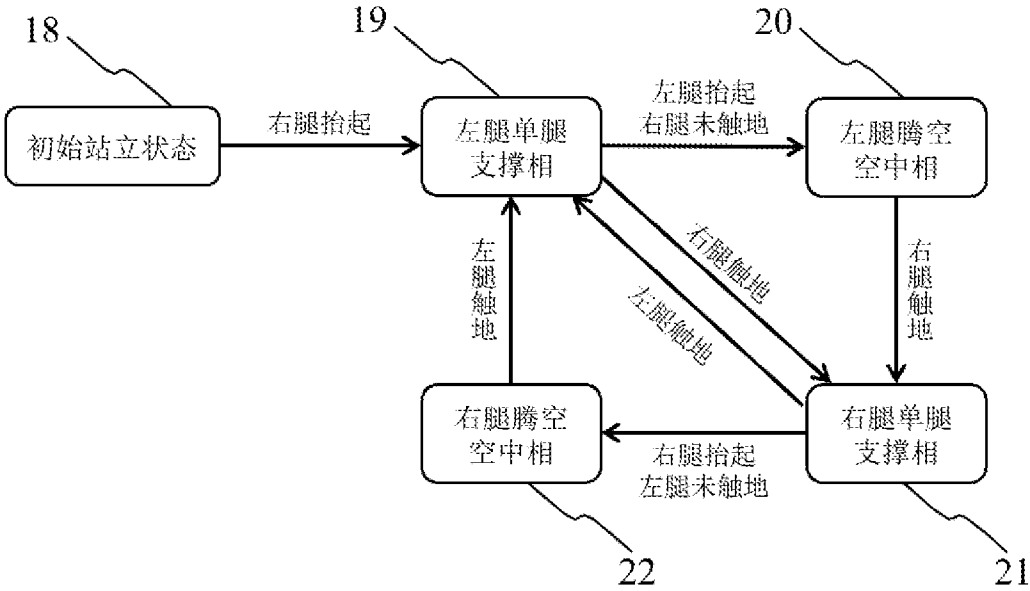


图 2

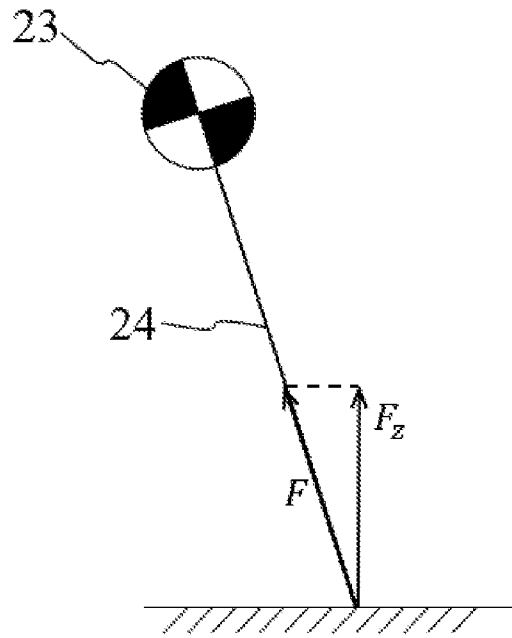


图 3

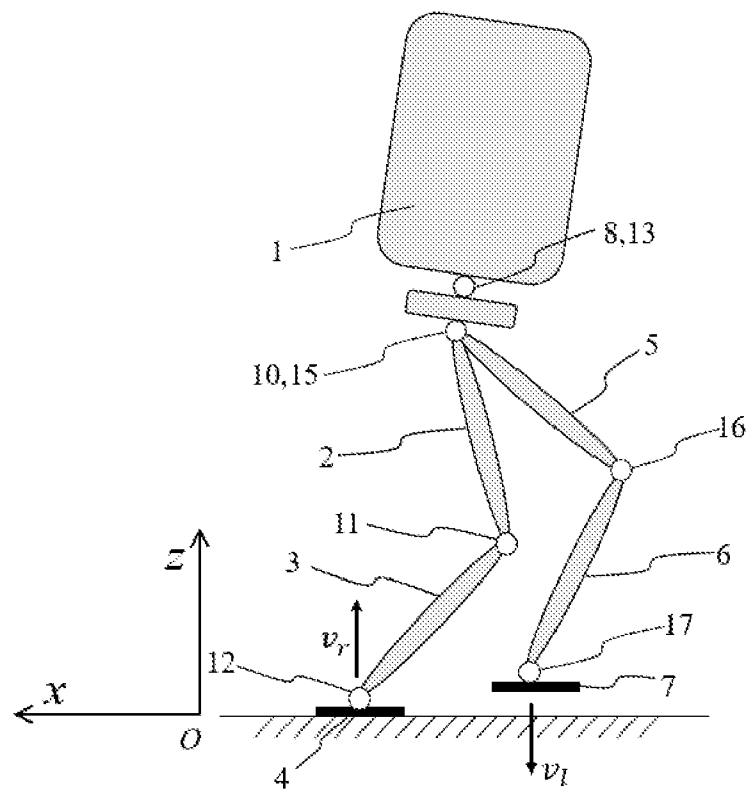


图 4

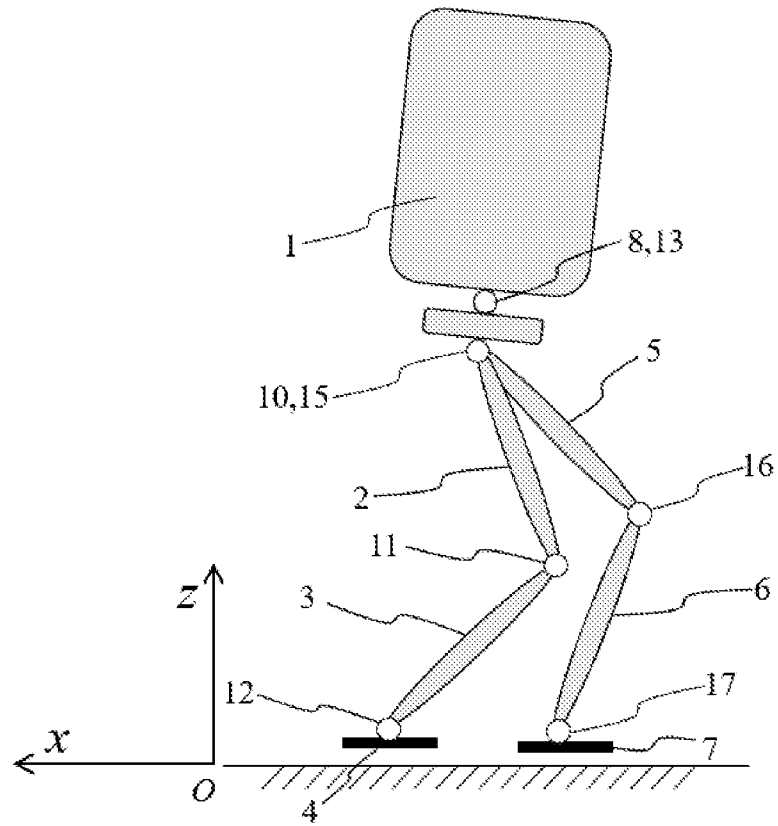


图 5

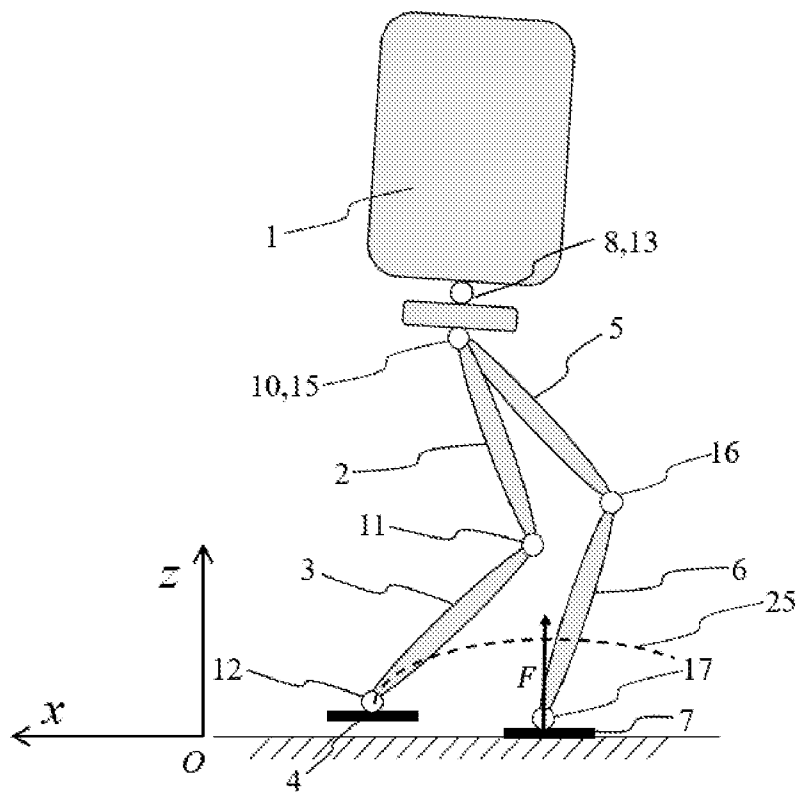


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/120770

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G05D 1/02(2020.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G05D; B25J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI, EPODOC, CNPAT, IEEE, CNKI: 机器人, 双足, 步态, 跑, 不平, 弹性负载倒立摆, 线性倒立摆, 飞行, 腾空, 着地, 触地, 状态, 自动机, 浙江大学, robot, biped, foot, run, uneven, SLIP, LIP, flight, land, state, automata, Zhejiang University

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102736628 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 17 October 2012 (2012-10-17) description, paragraphs [0043]-[0090], and figures 1-9	1-5
A	CN 107065867 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 18 August 2017 (2017-08-18) entire document	1-5
A	CN 110181541 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 30 August 2019 (2019-08-30) entire document	1-5
A	朱秋国 (ZHU, Qiuguo et al.). "欠驱动双足机器人稳定行走控制与策略 (Stable Walking Control and Strategy of Under-Actuated Biped Robot)" 《华中科技大学学报(自然科学版)》(Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)), Vol. 45, No. 10, 31 October 2017 (2017-10-31), ISSN: 1671-4512, pp. 18-24	1-5
A	HEREID, Ayonga et al. "Dynamic Multi-Domain Bipedal Walking with ATRIAS through SLIP based Human-Inspired Control" <i>HSCC'14: Proceedings of the 17th International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control</i> , 30 April 2014 (2014-04-30), ISBN: 978-1-4503-2732-9, pp. 263-272	1-5



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

14 August 2020

Date of mailing of the international search report

28 August 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/120770

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	102736628	A	17 October 2012	CN	102736628	B	07 May 2014
CN	107065867	A	18 August 2017	CN	107065867	B	31 May 2019
CN	110181541	A	30 August 2019	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/120770

A. 主题的分类

G05D 1/02 (2020.01) i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G05D; B25J

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

WPI, EPDOC, CNPAT, IEEE, CNKI: 机器人, 双足, 步态, 跑, 不平, 弹性负载倒立摆, 线性倒立摆, 飞行, 腾空, 着地, 触地, 状态, 自动机, 浙江大学, robot, biped, foot, run, uneven, SLIP, LIP, flight, land, state, automata, Zhejiang University

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 102736628 A (华中科技大学) 2012年 10月 17日 (2012 - 10 - 17) 说明书第[0043]-[0090]段、附图1-9	1-5
A	CN 107065867 A (浙江大学) 2017年 8月 18日 (2017 - 08 - 18) 全文	1-5
A	CN 110181541 A (浙江大学) 2019年 8月 30日 (2019 - 08 - 30) 全文	1-5
A	朱秋国 等. "欠驱动双足机器人稳定行走控制与策略" 华中科技大学学报(自然科学版), 第45卷, 第10期, 2017年 10月 31日 (2017 - 10 - 31), ISSN: 1671-4512, 第18-24页	1-5
A	HEREID, Ayonga et al. "Dynamic Multi-Domain Bipedal Walking with ATRIAS th- rough SLIP based Human-Inspired Control" HSCC' 14: Proceedings of the 17th international conference on Hybrid systems: computation and control, 2014年 4月 30日 (2014 - 04 - 30), ISBN: 978-1-4503-2732-9 第263-272页	1-5

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2020年 8月 14日

国际检索报告邮寄日期

2020年 8月 28日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

于白

电话号码 86-(10)-53961381

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/120770

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	102736628	A	2012年 10月 17日	CN 102736628 B	2014年 5月 7日
CN	107065867	A	2017年 8月 18日	CN 107065867 B	2019年 5月 31日
CN	110181541	A	2019年 8月 30日	无	